

土の等値的繰返し荷重について

九州大学大学院 学生員 羅 文 鵬

九州大学工学部 正 員 山 内 豊 隆

1. まえがき

繰返し荷重を受ける土は、繰返し荷重的作用によって疲労をおこし破壊する。いま、すでに周知のように、土は脆性破壊をおこすので、この土の破壊は土が載荷されることによって生じる変形が、ある一定の量に達することを意味する可きであり、このような考えは一般に支持用土構造物の設計においても多く取り入れられている。なお、このような繰返し荷重による土の変形の発生割合は、繰返し荷重の大きさ、またはその繰返し回数に対して直線的にはならず、その疲労特性に従う。

いま、実際問題として路床、路盤のような土構造物を例にとって見ると、これらの土はそれぞれ異なった、一定の周期を持つ、大小さまざまな交通荷重の走行による荷重の繰返しによって疲労をおこし破壊する。このような複合荷重による土の変形の過程は、すでに述べたように直線法則に従わず、その上また非常に複雑である。そこでこのような複合荷重を、その繰返しによって生じる疲労と同程度、または等しい疲労を生ぜしめるような、単一の繰返し荷重に換算することが出来れば、繰返し荷重による土の疲労の解析と便利にすることが出来、さらに舗装設計の合理化にも役立つものと思う。

本文ではこのような考えに基づき、最初に繰返し荷重を受ける土の疲労、または変形の発生割合は直線法則に従うものと仮定して、さらに疲労曲線と利用することによって、上に述べる所の複合荷重を等値的な単一の繰返し荷重に換算する式の誘導を試み、さらに実験によってそれがあつた条件下では可能である事を述べようとするものである。

2. 土の疲労に基づいた等値的繰返し荷重の求め方

いま、土に対して荷重 σ を繰返し載荷した場合、この土があらう一定のヒズミ ε に到達するのに必要な繰返し載荷回数と N とする。繰返し荷重による土のヒズミの発生の割合は繰返し回数に対して直線的であると仮定すると、この荷重を n 回繰返しすることによって生じる土のヒズミ量は $(n/N)\varepsilon$ になる。したがって土に対して荷重 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p$ とそれぞれ $n_1, n_2, \dots, n_p$ 回ずつ連続的に繰返しすることによって生じる土のヒズミ ε_c は n/N の累積比をもつて表わすことが出来る。すなわち、

$$\varepsilon_c = \left(\sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_i} \right) \varepsilon = \left(\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_p}{N_p} \right) \varepsilon \quad (1)$$

いまこの土の疲労曲線は

$$\sigma_i = a - b \log_e N_i \quad (2)$$

であつたとすれば、(1)式における N_i の値は(2)式より、次式をもつて置き替へることが出来る。

$$N_i = 1 / \exp \left(\frac{\sigma_i - a}{b} \right) \quad (3)$$

したがって (1) 式は

$$\varepsilon_c = \left(\sum_{i=1}^p n_i \exp \left(\frac{\sigma_i - a}{b} \right) \right) \varepsilon \quad (4)$$

いま、ある単独の荷重 σ_s とある一定の周期のもとで一定回数繰返した場合、ある一定のヒズミ ε_s に到達するまでの繰返し載荷回数 N_s とすると、 σ_s と前の複合荷重のそれぞれの適用回数の総和 $\sum_{i=1}^p n_i$ 回だけ繰返した場合生じるヒズミ ε_s は、

$$\varepsilon_s = \left[\left(\sum_{i=1}^p n_i \right) \exp \left(\frac{\sigma_s - a}{b} \right) \right] \varepsilon \quad (5)$$

いま、 $\varepsilon_c = \varepsilon_s$ とすると

$$\left[\sum_{i=1}^p n_i \exp \left(\frac{\sigma_i - a}{b} \right) \right] \varepsilon = \left[\left(\sum_{i=1}^p n_i \right) \exp \left(\frac{\sigma_s - a}{b} \right) \right] \varepsilon \quad (6)$$

$$\therefore \sigma_s = a + b \log_e \left[\frac{\sum_{i=1}^p \left\{ n_i \exp \left(\frac{\sigma_i - a}{b} \right) \right\}}{\sum_{i=1}^p n_i} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_s = a + 2.3 \log_{10} \left[\frac{\sum_{i=1}^p \left\{ n_i \exp \left(\frac{\sigma_i - a}{b} \right) \right\}}{\sum_{i=1}^p n_i} \right] \quad (8)$$

しかし、繰返し荷重による土の変形の過程は実際には直線的ではないので、(8) 式はさらに (9) 式をもつて表わすべきである。

$$K \sigma_s = a + 2.3 \log_{10} \left[\frac{\sum_{i=1}^p \left\{ n_i \exp \left(\frac{\sigma_i - a}{b} \right) \right\}}{\sum_{i=1}^p n_i} \right] \quad (9)$$

ここに、
 σ_s : 等価的繰返し荷重
 a, b : 疲労曲線より求まる定数
 K : 実験より求まる定数。

3. 実験方法

実験に使用した土試料の物理的性質は表-1に示すとおりである。このような試料と静的締固め方式により、それぞれ試料Ⅰは直径5cm、高さ21.1cm、試料Ⅱは直径3.5cm、高さ8cmの供試体を作成した。このようにして準備した供試体の含水比はそれぞれ21.0%および19.0%であり、この含水比による乾燥密度は最大乾燥密度の98%である。

前述の方法によって準備した2種類の供試体に対し、前者は一軸的、後者は三軸的に連続的繰返し

載荷を行なった。その荷重強さは静的圧縮強さを基準にして適宜に漸増あるいは漸減された数種の大さきを用いた。繰返し載荷周期は一軸の場合には2.5秒、三軸の場合には2.0秒を用いた。繰返し載荷中の供試体の全ヒズミはダイヤルゲージで読み取った。繰返し載荷回数は本実験の目的に従い、ヒズミがほとんど変わらなくなるとその回数と基準にした。

4. 実験結果および考察

表-2は複合荷重の繰返し載荷試験結果および等価的繰返し荷重 σ_e (計算による)の値を示し、図-1は横軸に土があら一定のヒズミに達するまでの繰返し載荷回数、縦軸に(8)式による等価的繰返し荷重 σ_e をもつて、一定荷重の疲労曲線と同一の繰回上に示したものである。実験に使った複合荷重は大別して、最初に相対的に最小な荷重を一定数繰返し、その逐次荷重を増加するものと、最初に相対的に最大な荷重を一定数繰返し、その後荷重を逐次減少するものの2種類に分けられる。もし複合荷重による繰返し載荷の場合もヒズミは直線的に生じるものとしたら、計算による σ_e の値は疲労曲線上に乗り等である。しかし前者の繰返し回数は実際には疲労曲線が示すものより大きく、後者の場合は小さい。このことは最初により小さい荷重を多数回繰返したのが、土の変形に対する抵抗がかなり大きくなったからである。後者はより大きい荷重強さを多数回繰返すことによって、土の変形に対する抵抗が減少するからである。この事は表-2に示す所の $(\Sigma \eta/N)$ の値からも定量的な説明が得られる。すなわち、前者の場合 $(\Sigma \eta/N)$ の値は1より大きく、後者の場合1より小さい。なお、図-1からもわかるように、前者の場合バラツキは非常に小さく、疲労曲線そのものまたは実験のバラツキから考えると、この程度のバラツキは実用上差し支えないものと思う。

表-1 実験に使用した土試料の物理的性質

試料 No.	I	II
三角座法による分類	砂質ローム	砂質粘土ローム
粒子の比重	2.72	2.72
有効粒径 (mm)	0.002	0.001
均等係数	74.7	120
液性限界 (%)	55.6	55.5
塑性指数 (%)	16.2	19.3
最適含水比 (%)	27.5	24.2
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.465	1.552

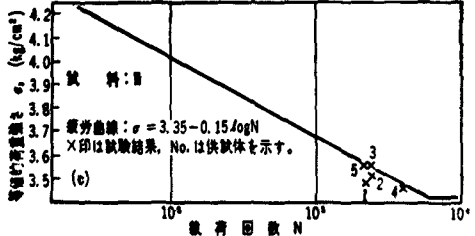
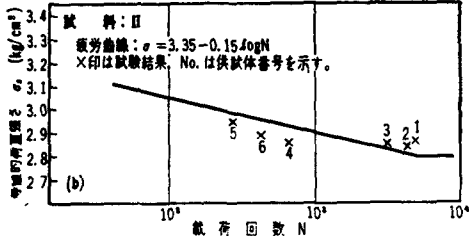
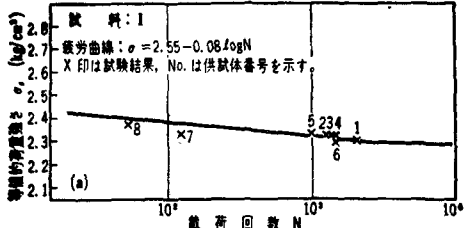


図-1 複合荷重による繰返し載荷試験結果

(a) 振動周期 2.5 秒，許容ヒズミ
1.15% に対する等値的繰返し
荷重 σ_e の計算値

供試体 No.	見かけ の荷重 (g/cm ²)	各荷重値 σ (上段)，それぞれの最大破壊荷重 N (下段) および実数振動周期数 n (中段)	σ_e (kg/cm ²)	$\Sigma \sigma_e$ ΣN
1	1.796	2.39 2.34 2.39 2.44 1880 1200 100 20	2.39	26821.32
2	1.796	2.39 2.32 2.37 2.42 2000 1200 180 32	2.32	13801.36
3	1.794	2.39 2.44 2.37 2.32 600 11 39 700 2800 32 100 1200	2.32	13431.30
4	1.791	2.39 2.32 2.37 2.42 600 1200 180 32	2.32	13321.30
5	1.799	2.39 2.42 2.32 2.37 2.34 2.32 2.39 200 9 15 35 170 210 2800 32 1200 180 500 1300 2800	1.39	10001.39
6	1.798	2.39 2.39 1420 35 2800 45	2.39	14561.31
7	1.790	2.39 2.39 30 90 45 2800	2.33	1200.70
8	1.788	2.39 2.39 33 19 45 2800	2.37	520.74

表-2 複合荷重の繰返し載荷試験結果
および等値的繰返し荷重 σ_e の計算値

(b) 振動周期 2.0 秒，許容ヒズミ 1.4% に
対する等値的繰返し荷重 σ_e の計算値

供試体 No.	見かけ の荷重 (g/cm ²)	各荷重値 σ (上段)，それぞれの最大破壊荷重 N (下段) および実数振動周期数 n (中段)	σ_e (kg/cm ²)	$\Sigma \sigma_e$ ΣN
1	1.701	2.61 2.91 3.01 3.12 3732 613 72 42 5000 1000 180 42	2.64	4682.73
2	1.714	2.61 2.91 3.01 3.12 2.61 2.61 2280 441 100 22 1400 4 5000 1000 180 42 5000 180	2.69	4682.62
3	1.701	2.61 3.01 2.91 3.12 2040 97 180 64 5000 180 1050 42	2.65	3682.81
4	1.701	3.01 2.91 2.61 110 10 145 180 1050 5000	2.65	682.73
5	1.692	3.01 2.91 100 170 180 1050	2.65	272.67
6	1.700	3.01 2.91 2.61 88 95 235 180 1050 5000	2.69	4182.62

(c) 振動周期 2.0 秒，許容ヒズミ 2.1% に
対する等値的繰返し荷重 σ_e に対する
計算値

供試体 No.	見かけ の荷重 (g/cm ²)	各荷重値 σ (上段)，それぞれの最大破壊荷重 N (下段) および実数振動周期数 n (中段)	σ_e (kg/cm ²)	$\Sigma \sigma_e$ ΣN
1	1.692	3.43 3.64 3.85 4.05 4.35 1881 227 42 20 3 6000 1300 350 95 84	3.49	2682.65
2	1.692	3.43 3.64 3.85 4.05 1950 331 85 42 6000 1300 350 95	3.62	2682.27
3	1.695	3.43 3.64 3.85 4.05 2035 195 85 54 6000 1300 350 95	3.66	2672.38
4	1.692	3.64 3.43 521 3429 1300 6000	3.46	2682.67
5	1.700	3.65 3.43 1183 959 1300 6000	3.66	2242.67

5. 結論

(1) 複合した繰返し荷重を，単独で等値的な繰返し荷重に換算する式を，土の疲労に基づいて求めた結果，(8) 式が得られた。

(2) 実験の結果，(8) 式をもつて，このような等値的繰返し荷重を求めることが可能であることがわかった。

(3) このような方法は，土の疲労に対する考察，土の疲労に基づいた設計輪荷重を求めるのに，または今後の舗装設計の合理化に役立つものと思う。

参考文献

- 1) 山内，羅：土の繰返し載荷試験結果の解釈と利用，土質工学会第11回土質工学シンポジウム論文集，昭和41.10.，pp 33-42
- 2) 羅，山内：土の疲労に基づいた輪荷重の求め方について，土質工学会第1回土質工学研究発表会論文集，昭和41.10.，pp 61-65